

登陸颱風內核結構

高聿正 周仲島

國立台灣大學大氣科學研究所

摘要

本文利用一套改良的單雷達渦旋風場反演技術，分析 2001 年納莉(Nari)颱風以及 2005 年海棠(Haitang)颱風登陸台灣階段的內核(inner core)環流結構變化特徵。結果顯示當納莉颱風登陸期間主要因地形影響因素，內核區環流結構有顯著的變化，當颱風中心約距離台灣北部陸地約 80 公里時，最大風速半徑(Radius of Maximum Wind, RMW)開始明顯的內縮，當中心接近登陸時底層徑向入流明顯增強、RMW 明顯向外傾斜，同時主環流結構呈現高度非軸對稱波數 1 結構。而在海棠颱風個案中，當中心接近陸地的過程中靠近東部海岸有一低層北風噴流形成，低層噴流存在於高度 3 公里以下，噴流核心約在高度 1 公里處。當海棠路徑開始南偏打轉時，主環流受地形影響呈現高度非軸對稱結構，同時在 2 個小時內經歷了由非軸對稱波數 1 轉換為波數 2 再轉換為波數 1 的過程。

關鍵詞:納莉颱風、海棠颱風、颱風內核結構、非軸對稱結構、垂直風切、GBVTD、GVTD。

一、前言

颱風是台灣最嚴重的天然災害之一，如何提升颱風預報能力降低災害損失一直以來都是相當具有挑戰性的工作，過去數十年間由於電腦科技及數值模式的進步，對於颱風的路徑預報能力有著長足的進步，但在颱風強度的掌握能力部分則相對較無顯著的進展，特別是當颱風與臺灣地形的交互作用之下，產生非常多複雜的中小尺度過程如路徑偏折、強度變化、副低壓及降雨結構改變等，使侵台颱風的預報面臨相當大的困難，其最主要原因之一為對於登陸颱風內核結構及其動力過程的了解有限。

內核區主要是在距離熱帶氣旋中心半徑 100 至 200 公里區域範圍內(Willoughby, 1988)，其主要結構包含眼(eye)及眼牆(eyewall)，眼牆由深對流所主宰並伴隨強風區，也往往是造成災害的最直接原因。

地基速度軌跡顯示法(Ground-Base Velocity Track Display, GBVTD)能有效的利用都卜勒雷達徑向風場資料來反演颱風內核區運動結構(Lee et al. 1999)，且成功應用於登陸颱風個案的中尺度特徵研究中(Lee et al. 2000)，但 GBVTD 方法本身由於幾何假設及分析座標的關係，有其缺點與限制，主要包含：1)分析範圍侷限於颱風中心與雷達連線的有限區域範圍中。2)反演風場有變形的情況。3)無法反演環境平均風場垂直於雷達波束的分量。4)無法反演非軸對稱徑向風分量。過去有許多研究針對上述缺點進行改善(李, 2006 ; Jou et al. 2008)，但缺乏一整合性的方法可有效的改善 GBVTD 方法主要的缺點。

本文以過去研究為基礎，發展一套改良的單雷達渦旋風場反演技術，並將其應用於 2001

年納莉(Nari)颱風以及 2005 年海棠(Haitang)颱風的個案分析中。

二、分析方法

Jou et al. (2008)提出廣義速度軌跡顯示法(Generalized Velocity Track Display, GVTD),利用都卜勒速度與觀測點到雷達距離乘積的新變數,來反演颱風環流結構,可以有效改善 GBVTD 方法中分析範圍侷限以及反演風場變型的問題。李(2006)則是發展一套利用雷達觀測資料反演環境平均風場的疊代方法,除可合理估計颱風所處的環境平均風的大小與方向外,也可有效改善 GBVTD 方法在環境平均風場垂直雷達波束分量顯著時,所造成反演風場顯著誤差的情況。

本文整合 Jou et al. (2008)及李(2006)的觀念,發展一套新的方法能夠有效改善 GBVTD-simplex 颱風中心定位方法(Lee et al. 2000)範圍侷限以及 GBVTD 方法中分析範圍侷限、反演風場變形及無法反演環境平均風場的問題。分析方法流程步驟為(1)颱風中心定位:利用轉換至等高面直角座標(CAPPI)之都卜勒徑向風場資料,以改善之方法(本文稱之 GVTD-simplex)進行颱風中心定位。(2)環境平均風場估計:利用環境平均風場在等高面都卜勒徑向速度與雷達距離乘積量場中呈現平行線特徵的特性,來估計初始環境平均風場,將估計所得之初始環境平均風場代入 GVTD 方法中反演出颱風環流,再將颱風環流予以扣除,並重新估計環境平均風場,重複此一步驟直到前後計算出之環境平均風差異在一定門檻值以下(1m/s),即可得到最佳估計之環境平均風場。(3)颱風環流結構反演:利用 GVTD-simplex 所定出之颱風中心以及最佳估計之環境平均風場資訊,以 GVTD 方法在等

高面上進行颱風環流結構反演,反演風場包含軸對稱切向風分量、非軸對稱切向分量(至波數 3)與軸對稱徑向風分量。

本文以一理想實驗針對上述分析方法進行測試,並驗證方法之表現。理想實驗分析範圍為 300x300 公里,雷達位於分析範圍的中心,在雷達正北方 75 公里處放置一理想軸對稱阮肯渦旋(Rankine vortex),渦旋最大風速半徑設定為 30 公里,最大切向風速設定為 30m/s,同時在分析範圍內疊加一理想環境平均風場,風速為 10m/s,方向為 210°(風的去向,以數學角表示,0°代表正東),結果顯示由於理想環境平均風場有顯著垂直雷達波束分量,GBVTD 方法無法正確反演環境平均風場,此外又由於估計環境平均風場的誤差,進而造成反演渦旋軸對稱切向風分量時也產生顯著的誤差(圖 1c),而本文所提出改善之反演方法不論是在環境平均風場的估計(風向風速的誤差均小於 1%)以及軸對稱渦旋風場的反演都相當理想(圖 1d)。

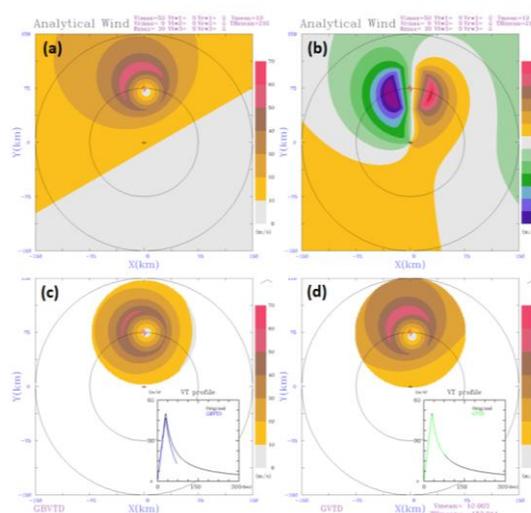


圖 1: (a)為理想軸對稱阮肯渦旋疊加理想環境平均風場的風速分布。(b)為其對應的都卜勒徑向速度分布圖。(c)為利用 GBVTD 方法反演之結果。(d)為改善之分析方法的反演結果。

三、登陸颱風內核環流結構特徵

本文將上述改善分析方法實際應用於登陸颱風個案，並分析其登陸階段內核區(距離颱風中心半徑 80 公里區域範圍內)之環流結構變化特徵，本文選取之個案為 2001 年之納莉(Nari)颱風以及 2005 年的海棠(Haitang)颱風。

(一) 納莉颱風

納莉颱風的分析時段為 2001 年 9 月 16 日 0440UTC 至 1340UTC，即颱風中心登陸前 9.5 小時至前 0.5 小時(圖 2a)。在 4 公里高度上內核區的主環流結構(已將反演出的環境平均風場扣除)，其主要特徵為呈現非軸對稱結構，且隨時間由波數 1 轉變為波數 2 再轉變為波數 1(圖 2b、2c、2d)，特別在颱風中心即將登陸前前 2 小時(圖 3b)，位於移動方向左後側的非對稱波數 1 結構相當顯著。

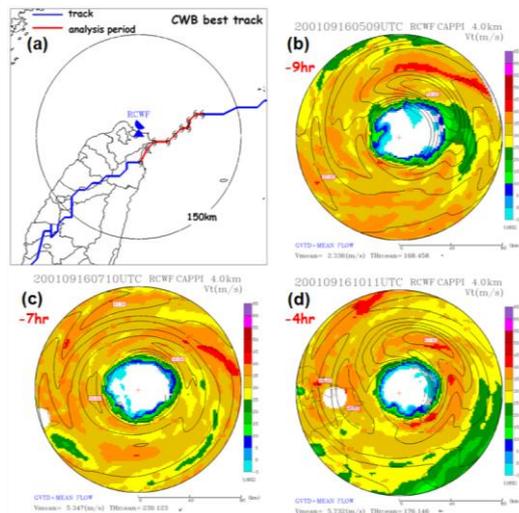


圖 2：(a)為納莉颱風分析時段路徑圖。(b)、(c)、(d)分別為納莉颱風中心登陸前 9、7 及 4 小時 4 公里高度上內核區主環流結構。

根據研究環境垂直風切是造成颱風非軸對稱結構的一個重要因素，Corbosiero and Molinari (2003)探討移動方向與垂直風切對於洋面上的熱帶氣旋之對流分布何者影響較大，結果顯示只考慮移動方向之影響，對流主要集中在熱帶氣旋移動方向右前方，若只考慮

垂直風切之影響，熱帶氣旋內核區的對流主要集中在下風切處左側。在納莉颱風中心登陸前 2 小時，利用各高度層估計之環境平均風場(受限於資料，環境平均風僅估計至 7.5 公里高度)估算環境垂直風切約為 6m/s，風切方向為西北西(圖 3a)，對應同時時間 2 公里高度的回波及主環流結構(圖 3b)，顯著的非軸對稱波數 1 結構即位於下風切處略偏右側。

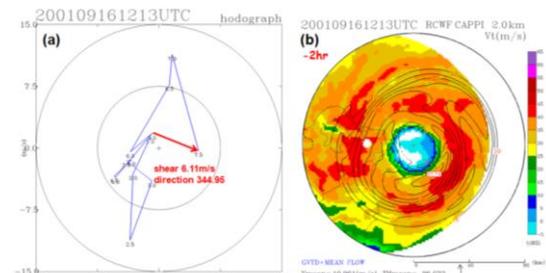


圖 3：(a) 為納莉中心登陸前 2 小時，各個高度層所估計之環境平均風場所繪製的風徑圖(受限於資料，環境平均風僅估計至 7.5 公里高度)。(b) 為同時時間 2 公里高度上的颱風主環流及回波結構。

除了垂直風切之外，當颱風接近陸地時，地形因素也可能是造成颱風呈現非軸對稱結構的重要因素之一，Kepert (2006)分析 1998 年大西洋 Mitch 颶風，在 Mitch 颶風中心靠近陸地時，在移動方向左後方有顯著非軸對稱波數 1 的結構，由於 Mitch 所處的環境風切相當弱(颱風中心半徑 200 公里範圍內，風切小於 3m/s)，因此 Kepert 認為 Mitch 在靠近陸地時因摩擦增強引發內流增強，同時並往海面上延伸，透過角動量的傳輸增強在下游處颱風環流的強度，進而形成非軸對稱波數 1 的結構分布。

在納莉颱風登陸過程中，垂直風切或是地形摩擦效應何者是形成非軸對稱結構的主因，在此並不容易量化釐清，但在分析的過程中仍可以清楚發現地形對納莉颱風結構影響的訊號。從距離颱風中心半徑 80 公里範圍內

的軸對稱切向風的時間序列圖(圖 4)可以發現，最大風速半徑(Radius of Maximum Wind, RMW)不論是在 2 公里或是 4 公里高度上均有明顯內縮的特徵，特別是在登陸前 7 小時開始 4 公里高度 RMW 內縮相當明顯，此時納莉颱風中心約距離台灣北部陸地約 80 公里，此一分析結果隱含著納莉颱風的內核環流從此刻開始受到地形的顯著影響。

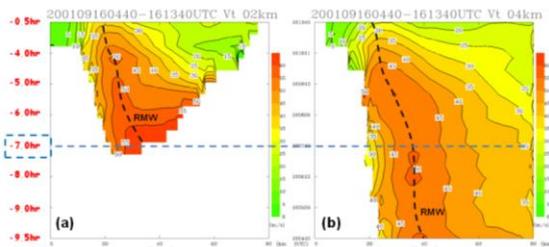


圖 4：(a)、(b)分別為分析時間中，距離颱風中心半徑 80 公里範圍內 2 公里及 4 公里高度上軸對稱切向風的時間序列圖。

進一步檢視軸對稱切向風垂直剖面結構的變化特徵，當納莉颱風距離陸地較遠時 RMW 隨高度的分布較為垂直(圖 5a)，而當納莉颱風中心即將登陸時(圖 5b) RMW 則是有明顯傾斜的特徵，同時軸對稱切向風也有顯著減弱的情況。另外在軸對稱徑向風垂直剖面結構變化特徵的部分，在納莉颱風中心接近登陸階段，低層徑向入流有顯著增強增厚的情況，最大徑向入流由 10m/s 增強至 22m/s，入流區厚度由 2 公里增加為 3 公里。上述分析結果與翁(2009)利用 MM5 數值模式模擬分析納莉颱風登陸特徵的結果相當類似。

在納莉颱風登陸期間由於其移動速度緩慢且環境垂直風切偏弱，因此其非軸對稱結構出現與增強的主要原因，推測應為颱風環流與地形交互作用，另外中心登陸時因地形增強之低層內流輻合作用，亦可能是眼強內縮的重要原因，同時此內縮現象在中低層較明顯，因此形成 RMW 隨高度較為顯著的傾斜。

(二) 海棠颱風

2005 年海棠颱風在登陸前，其中心在台灣東部外海有打轉的現象，Jian and Wu (2008)

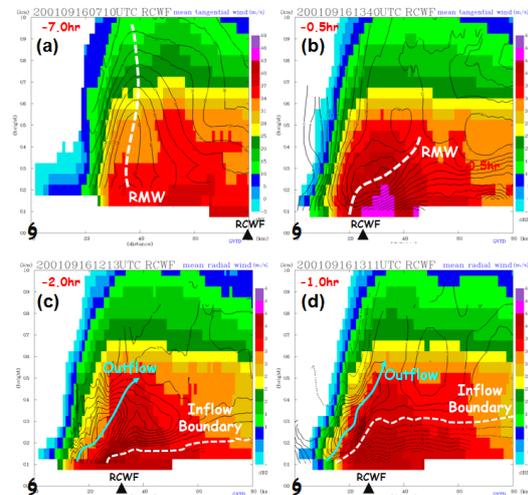


圖 5：(a)、(b)分別為納莉颱風中心登陸前 7 及 0.5 小時半徑 80 公里範圍內軸對稱切向風分量垂直剖面。(c)、(d)分別為納莉颱風中心登陸前 2 及 1 小時半徑 80 公里範圍內軸對稱徑向風分量垂直剖面。

利用高解析的數值模式探討海棠登陸前路徑打轉的原因，其分析結果發現，當海棠颱風中心接近至離海岸約 60 公里處時，地形東側海岸線附近因渠流效應而有一支低層的北風噴流產生，隨著海棠颱風中心逐漸靠近，此一北風噴流疊加颱風環流造成颱風移動前方(西側)的波數 1 非軸對稱結構特徵明顯，此一波數 1 非軸對稱結構造成颱風路徑的往南偏移，而當颱風中心貼著海岸向南移動的過程中，因地形磨擦減弱颱風靠地形側的環流，使得波數 1 非軸對稱結構轉而出現在洋面側(東側)，並造成後續路徑的向北偏折，進而完成路徑打轉一圈的過程。本文從觀測的角度，利用花蓮雷達資料以及新發展之風場反演方法分析海棠颱風路徑發生轉折階段之環流結構變化特徵。

Jian and Wu (2008)數值模式分析中所提到的靠近東海岸的低層北風噴流，在花蓮雷達的都卜勒徑向速度場上也有被清楚觀測到，圖

6a、b 分別為 2005 年 7 月 17 日 1853UTC 花蓮雷達 1 公里及 2 公里高度的都卜勒徑向速度場，在花蓮雷達北側靠近東部海岸線的近海處，有一明顯的吹入雷達的強風區，此即為近海岸的低層北風噴流，此低層噴流存在於高度 3 公里以下，噴流核心約在高度 1 公里處，噴流核心的最大風速約 46m/s，而此時海棠颱風的中心距離花蓮雷達約 111 公里。

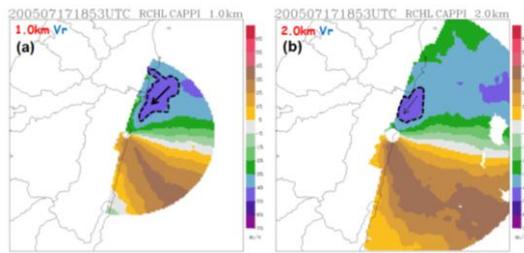


圖 6: (a)、(b)分別為 2005 年 7 月 17 日 1853UTC 花蓮雷達 1 公里及 2 公里高度的都卜勒徑向速度場。

海棠颱風環流結構變化特徵的分析時段為中心開始打轉的 2 個小時(2005 年 7 月 17 日 2033UTC 至 2233UTC，2233UTC 之後花蓮雷達停止觀測)，本文將 2 個小時的分析時段區分為時段一：中心向西移動(2143UTC 以前)，以及時段二：中心開始向南偏移(2143UTC 以後)，方便後續討論。分析時段的路徑如圖 7a 所示，圖 7b、c 及 d 分別為 7 月 17 日 2103UTC、2143UTC 及 2223UT 在 2 公里高度上的主環流結構(已將此時段所估計出的系統平均移速 $U:-7.71\text{m/s}$ ； $V:-1.35\text{m/s}$ 予以扣除)，在 2103UTC 顯著的非軸對稱波數 1 結構位於移動方向左後側；2143UTC 原本的非軸對稱波數 1 結構轉變為非軸對稱波數 2 結構；2223UTC 非軸對稱結構又轉變為波數 1。

進一步將分析時段中的海棠颱風主環流以時間序列圖方式呈現，將可更清楚了解主環流結構的變化特徵。軸對稱切向風分量部分(圖 8a)在整個分析時段中，RMW 隨著時間是

有顯著內縮的情況(約由 65 公里內縮至 15 公里)，而風速值的變化在分析時段先是短暫

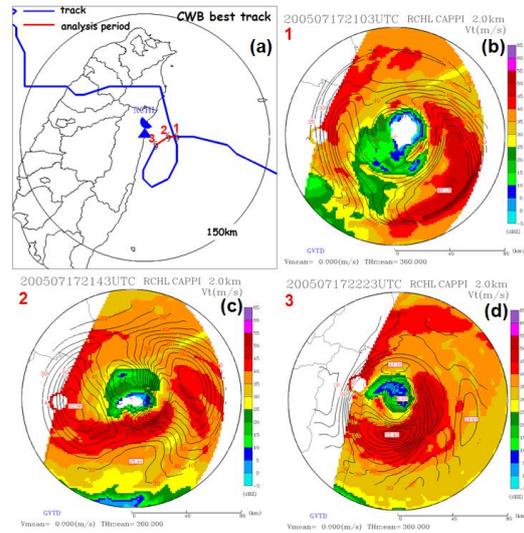


圖 7: (a)為海棠颱風分析時段路徑圖。(b)、(c)、(d)分別為 17 日 2103UTC、2143UTC 及 2223UTC(即對應圖 a 中所標示之 1、2、3 點位)在 2 公里高度上的主環流結構。

減弱，隨後在 2053UTC 至 2133UTC 則是有明顯增強的情況，當進入階段二後，風速值則是快速的減弱。另外在非軸對稱切向風結構部分(圖 8b)，於階段一期間位於海棠平均移向右側(靠近地形的一側)及左側的風速值隨時間均有增強的情況，風速極值左側大於右側，即較顯著的非軸對稱結構是位於靠海面的一側，在海棠平均移向右側(靠近地形的一側)的風速值增大的成因可能即如 Jian and Wu (2008)所推測，是由近海岸處的北風噴流疊加颱風環流所造成，但較顯著的非軸對稱結構位於海棠平均移向左側則是與 Jian and Wu (2008)的分析結果不同。而在階段二海棠平均移向右側(靠近地形的一側)的風速值快速減弱，海棠平均移向左側仍維持相對較強的風速，此一變化特徵的成因可能即如 Jian and Wu (2008)所推測，地形摩擦使得海棠平均移向右側環流減弱，非軸對稱波數 1 結構轉而移動至海棠平均移向左側，不過與 Jian and Wu (2008)分析結果有所不

同的是，上述非軸對稱波數 1 結構移動至海棠平均移向左側的特徵出現的時間是發生在中心開始往南轉折的初期，明顯早於 Jian and Wu (2008)的分析結果。

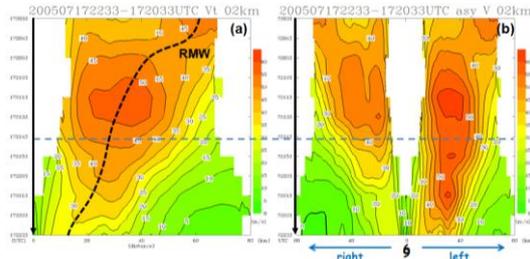


圖 8：(a)為分析時段中，距離颱風中心半徑 80 公里範圍內 2 公里高度上軸對稱切向風的時間序列圖，時間軸線是往下增加。(b)為非軸對稱切向風結構時間序列圖，以分析時段颱風平均移向區分為靠颱風移向右側及左側。虛線為兩階段之分界線。

四、結論

本文所提出改善之單雷達颱風風場反演方法可有效改善 GBVTD-simplex 颱風中心定位方法範圍侷限以及 GBVTD 方法中分析範圍侷限、反演風場變形與無法反演環境平均風場的問題，並將此方法應用於實際颱風個案分析之中。

分析結果顯示納莉颱風登陸期間主要因地形影響因素，內核區結構有顯著的變化，當颱風中心約距離台灣北部陸地約 80 公里時，RMW 開始明顯的內縮，當中心接近登陸時底層徑向入流明顯增強增、RMW 明顯向外傾斜，同時主環流結構呈現高度非軸對稱波數 1 結構。而在海棠颱風個案中，當中心接近陸地的過程中靠近東部海岸有一低層北風噴流形成，低層噴流存在於高度 3 公里以下，噴流核心約在高度 1 公里處。當海棠路徑開始南偏打轉時，主環流受地形影響呈現高度非軸對結構，同時在 2 個小時內經歷了由非軸對稱波數

1 轉換為波數 2 再轉換為波數 1 的過程。

【參考文獻】

- 李宗融，2006：都卜勒雷達在颱風環流結構與平均風反演之應用。台灣大學大氣科學研究所碩士論文，共103頁。
- 翁靜儀，2009：MM5模式模擬之納莉颱風(2001)登陸時風場結構變化。中央大學大氣物理研究所碩士論文，共69頁。
- Corbosiero, K. L. and J. Molinari, 2003: The Relationship between Storm Motion, Vertical Wind Shear, and Convective Asymmetries in Tropical Cyclone. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 366-376.
- Jian, G.-J., and C.-C. Wu, 2008: A Numerical Study of the Track Deflection of Supertyphoon Haitang (2005) Prior to Its Landfall in Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 598-615.
- Jou, B. J.-D., W.-C. Lee, S.-P. Liu, and Y.-C. Kao, 2008: Generalized VTD retrieval of atmospheric vortex kinematic structure. Part I: Formulation and error analysis. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 995-1012.
- Keper, J. D., 2006: Observed Boundary Layer Wind Structure and Balance in the Hurricane Core. Part II: Hurricane Mitch. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 2194-2211.
- Lee, W.-C., B. J.-D. Jou, P.-L. Chang, and S.-M. Deng, 1999: Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single-Doppler radar observation. Part I : Interpretation of Doppler velocity patterns and GBVTD technique. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 2419-2439.
- Lee, W.-C., B. J.-D. Jou, P.-L. Chang and F. D. Marks, 2000: Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single-Doppler radar observation. Part III: Evolution and structure of Typhoon Alex(1987). *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3982-4001.
- Lee, W.-C. and F. D. Marks, 2000: Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single-Doppler radar observations. Part II : The GBVTD-simplex center finding algorithm. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1925-1936.
- Willoughby, 1988: The dynamics of the tropical cyclone core. *Aust. Meteor. Mag.*, **36**, 193-191.